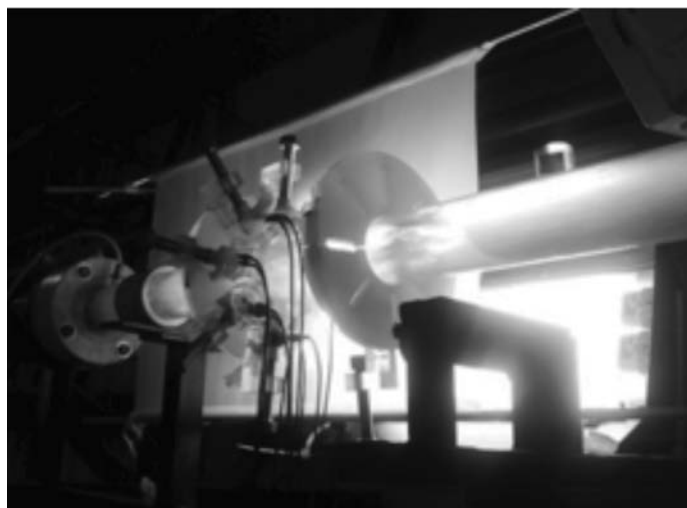


Una comparación entre las mediciones ultrasónicas y las simulaciones numéricas tridimensionales de flujos bifásicos (aire-agua) en una tubería horizontal

NICOLÁS RATKOVICH*
RICARDO CARVALHO*
ANTÔNIO BANNWART*



Resumen

Los flujos bifásicos (gas-líquido) están presentes en distintos procesos industriales (por ejemplo, la industria petrolera y de gas). Varios estudios sobre flujos bifásicos se concentran en el desarrollo de correlaciones empíricas basadas en grandes conjuntos de datos experimentales para la fracción de vacío. Dichos conjuntos resultan robustos exclusivamente para las condiciones específicas con las cuales fueron desarrollados, lo que limita su aplicabilidad. El objetivo de este estudio es analizar el flujo bifásico en una tubería horizontal —en términos de la fracción de vacío—, usando la dinámica computacional de fluidos (CFD), donde se comparan directamente los resultados numéricos con las mediciones experimentales, y utilizando una técnica de ultrasonido. El montaje experimental consta de un tubo

* Departamento de Ingeniería Química, Grupo de Diseño de Productos y Procesos (GDPP), Universidad de Los Andes. Cra. 1 N° 18ª - 12. Bogotá, Colombia

* Universidade Federal de Itajubá (Unifei), Itajubá, MG, Brasil.

* Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas, SP, Brasil.

Fecha de recepción: 27/07/2013 • Fecha de aceptación: 30/09/2013.

horizontal de 29 m. de largo y 54 mm. de diámetro. El modelo de la CFD bifásico se llevó a cabo con el *software* de CD-adapco STAR-CCM+, empleando el modelo de volumen de fluido (VOF). Se encontró una buena concordancia (33.3 % de error) entre las mediciones experimentales y los resultados de CFD para la fracción de vacío. Esto demuestra que la CFD se puede utilizar para predecir la fracción de vacío y puede ser utilizada para los procesos de diseño y escalado.

Palabras clave: flujo tipo *slug*, mezcla agua-aire, simulaciones numéricas, STAR-CCM+.

Abstract

Gas-liquid two-phase flows (TPFs) are present in several industrial processes (e.g. oil-gas industry). Various studies on TPF focus on developing empirical correlations based on large sets of experimental data for void fraction, which have proven accurate for the specific conditions for which they were developed, thus limiting their applicability. The focus of this study is the analysis of the TPF (slug flow) in a horizontal pipe in terms of void fraction using computational fluid dynamics (CFD) and directly comparing the results with experimental measurements using an ultrasonic technique. A 29-m long, 54-mm ID horizontal pipe was used for the experiments. The two-phase CFD model was implemented in CD-adapco STAR-CCM+ using the volume of fluid (VOF) model. A relatively good agreement (33.3 % error) was found between the experimental measurements and the CFD results for the void fraction. This shows that CFD can be used to predict void fraction and it can be used for design and scale-up processes.

Keywords: Slug-Flow, air-water mixtures, numerical simulations, STAR-CCM+.

11 Introducción

Muchos procesos industriales tienen flujos bifásicos (por ejemplo, tuberías de hidrocarburos, procesos de condensación y evaporación, etc.). En las tuberías, la distribución de las fases líquida

y de gas en el tubo constituye un parámetro importante para la descripción del flujo y tiene una influencia directa en la caída de presión y transferencia de calor; por tanto, las distribuciones de flujo específico se denominan patrones de flujo (burbujeante, estratificado, pistón, anular, etc.). En la práctica no es fácil predecir la frecuencia y la transición entre estos patrones de flujo, por lo que se buscan modelos sencillos y robustos.

El modelado de flujos bifásicos en tuberías horizontales, verticales e inclinadas es complejo, debido a: (i) dificultades en la ubicación de la interfaz entre las fases gaseosa y líquida, que depende del patrón de flujo; (ii) el deslizamiento entre las fases, lo que hace que el gas fluya más rápido que el líquido, afectando la fracción (distribución) de gas a lo largo del tubo, y (iii) las fluctuaciones de presión generadas por el paso de burbujas dentro de la tubería. Las metodologías actuales para el modelado de flujos bifásicos son las siguientes: correlaciones empíricas y modelos numéricos. Las primeras se basan en la observación directa y una amplia colección de datos. A partir de estos, se desarrollan modelos empíricos que correlacionan los parámetros de flujo y las propiedades de los fluidos (velocidades superficiales de las fases, densidades, viscosidades, tensión superficial, diámetro del tubo, etc.). En las correlaciones empíricas, a pesar de que estas pueden dar excelentes resultados, su aplicación se limita a las condiciones en que los experimentos fueron realizados. Por esta razón, los modelos numéricos se han convertido en una herramienta muy importante para describir flujos bifásicos dentro de tuberías (por ejemplo, características hidrodinámicas de los patrones de flujo, tales como la caída de presión y los parámetros de la intermitencia de flujo). El patrón de flujo más común y más difícil de modelar es el flujo tipo *slug* (pistón) (Ortega & Nieckele, 2005; Tanahashi, Paiva, Grangeiro, Carvalho, Venturini, Bannwart & Bizotto, 2010). Otros autores han utilizado la dinámica computacional de fluidos (Computational Fluid Dynamics - CFD) con el método de volumen de fluido (Volume Of Fluid - VOF), para investigar la interfaz de la burbuja, la fracción de vacío, la caída de presión, etc. (Taha & Cui, 2006). Ratkovich, Chan, Berube y Nopens (2009) encontraron un acuerdo razonable entre las mediciones experimentales y las simulaciones de CFD, lo que demuestra la aplicabilidad de CFD para este campo.

Para el desarrollo de modelos numéricos, es necesario comprender los mecanismos físicos que rigen los flujos bifásicos y, así mismo, se requiere información detallada sobre el comportamiento de estos. Por lo tanto, el acceso a datos experimentales fiables es de suma importancia para el desarrollo de modelos numéricos, con el fin de asegurar su solidez y aplicabilidad. Por otra parte, existe un interés creciente en las técnicas no invasivas para la medición de la concentración de la fase dispersa, la determinación del patrón de flujo, el monitoreo de la fracción de vacío, la velocidad de la burbuja, y otras variables básicas en flujos bifásicos.

La técnica de ultrasonido (Ultra Sound Technique - UST) es muy prometedora. Esta técnica está bien establecida en otros campos como la medicina y la ingeniería de materiales, y su aplicación a sistemas bifásicos ha sido el objeto de un gran número de trabajos de investigación (Murakawa, Kikura & Aritomi, 2005; Tanahashi et al., 2010). Las señales ultrasónicas son ricas en información y pueden penetrar tuberías, líquidos ópticamente opacos y suspensiones densas (por ejemplo, aceite). Además, las señales no son significativamente degradadas por una amplia gama de condiciones de proceso y pueden proporcionar mediciones en tiempo real y visualizaciones *in situ* (Bond, Morra, Greenwood, Bamberger & Pappas, 2003).

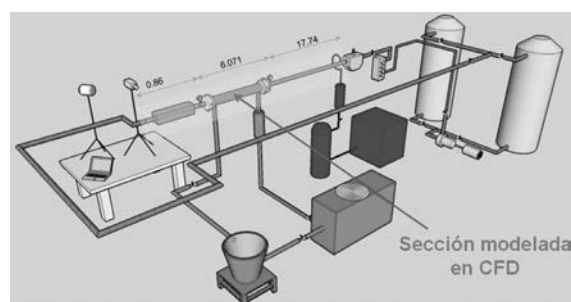
Los objetivos del presente estudio son tres: (i) desarrollar un modelo numérico del patrón de flujo tipo *slug*, que podría ser utilizado en un entorno industrial; (ii) la obtención de datos experimentales para validar el modelo con el uso de la técnica de UST, e (iii) idear maneras de acoplar la UST con las simulaciones numéricas, a fin de que este último sea más rápido y más fiable. Los datos ultrasónicos se obtuvieron para los flujos tipo *slug* aire-agua, en una tubería horizontal de 54 mm. de diámetro. Los datos incluyen la longitud y la velocidad de las burbujas, y el espesor de la película de líquido por debajo de estas últimas. De acuerdo con estos, la fracción de vacío se calculó y se comparó con el resultado correspondiente, a partir del modelo CFD del flujo de tipo *slug*. El modelo numérico se ha desarrollado utilizando el software STAR-CCM+ v8.02 (CD-adapco). Este, en particular, se ha usado con éxito para modelar el flujo bifásico en tuberías, y utilizando el VOF (Ratkovich, Majumder & Bentzen, 2013).

2. Métodos

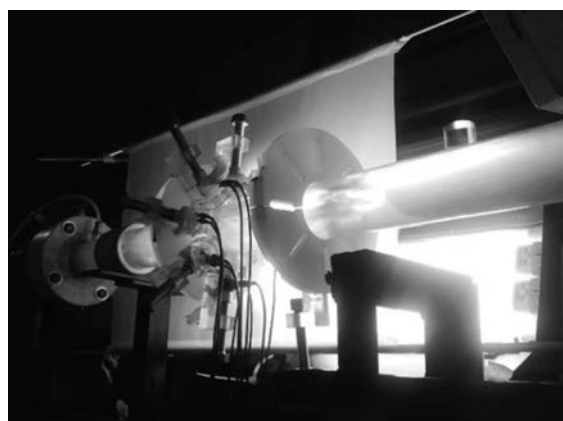
2.1. Bancada experimental

Las pruebas fueron realizadas en una bancada experimental (Figura 1), diseñada y construida en LabPetro (Unicamp - Brasil) para el estudio de los flujos bifásicos horizontales intermitentes. En la Figura 1a, se observa que la bancada está dividida en cuatro secciones: (i) la sección de entrada, hecha en acero con una longitud de 17.74 m., para permitir que el flujo bifásico se desarrolle; (ii) un intercambiador de calor, hecho en acero con una longitud de 6.071 m.; (iii) un tubo de acrílico, con una longitud de 0.86 m., para la visualización del flujo bifásico donde, adicionalmente, se encuentra el dispositivo de UST (Figura 1b), y (iv) la sección de salida, hecha en acero, con una longitud de 4.4 m. de longitud. En este estudio, particularmente, los flujos fueron adiabáticos; la caída de presión se monitorizó en la sección del intercambiador de calor, y la fracción de vacío y la velocidad de las fases se midieron en la sección iii. Una descripción detallada de este dispositivo de prueba se muestra en el estudio de Grangeiro (2010).

Figura 1. (a) Bancada experimental para el estudio de flujos bifásicos y **(b)** Sección de visualización



(a)



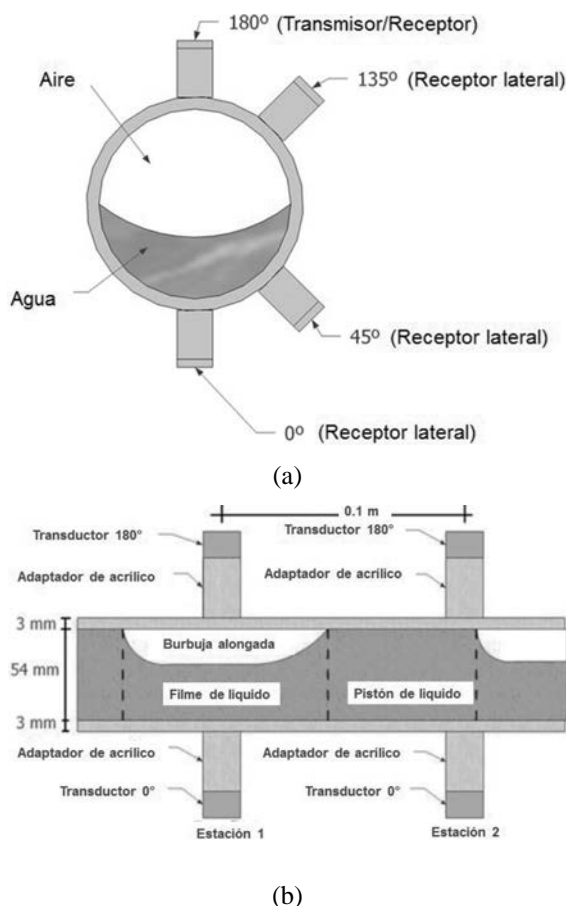
(b)

Fuente: elaboración propia.

2.2 Medidas ultrasónicas

El desarrollo de la técnica ultrasónica para flujos intermitentes se llevó a cabo por primera vez por Grangeiro (2010). Una discusión de este trabajo también se puede encontrar en el trabajo de Tanahashi et al. (2010). El dispositivo ultrasónico utilizado por estos autores es el mismo que se empleó en la presente investigación, como se puede observar en la Figura 2a. Un transductor emisor-receptor se ubica en la parte inferior ($\theta = 0^\circ$), con un receptor de transmisión directamente opuesta a ella ($\theta = 180^\circ$); los receptores secundarios ($\theta = 45^\circ$ y 135°) están destinados a proporcionar información complementaria acerca de la estructura del flujo y las fluctuaciones de la misma (Figura 2a).

Figura 2. (a) Vista transversal del sistema ultrasónico y (b) Estaciones ultrasónicas para medir la velocidad de las burbujas



Fuente: elaboración propia.

Para la prueba se utilizaron sensores ultrasónicos Panametrics VideoScan 2.25 MHz de 13 mm. de diámetro. Se aplicó, antes del montaje, una capa fina de gel en la superficie frontal de

los transductores, con el objetivo de mejorar el contacto con la superficie del tubo. Se ubicaron dos estaciones de medición ultrasónica –distanciadas a 0.1 m. la una de la otra–, en el exterior del tubo de plexiglás, con el propósito de obtener la velocidad de la burbuja (Figura 2b). Estos sensores ultrasónicos fueron sincronizados con una cámara de alta velocidad, de modo que pudiera realizarse una comparación directa. Se están desarrollando mejoras en la UST, a fin de que el acoplamiento entre el ultrasonido y las simulaciones de CFD sea más fiable y preciso.

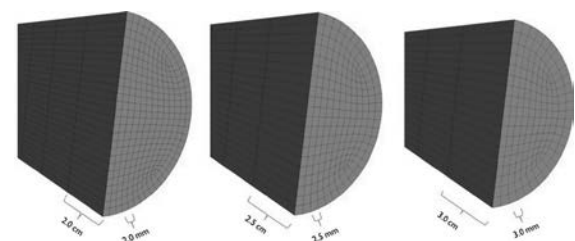
2.3 Medidas ultrasónicas

2.3.1 Tamaño de la malla

En este estudio, se construyeron tres geometrías tridimensionales en STAR-CCM+. El dominio fue de 29.071 m. de largo y de 54-mm. de diámetro, tal como fue presentado en la sección 2.1; dada la simetría en el plano axial, solo la mitad del tubo fue modelado. Se utilizaron dos capas de 525 micras cerca de la pared del tubo, para capturar adecuadamente la capa límite entre la pared y la burbuja. La primera capa se fijó a una distancia de $1 \cdot 10^{-6}$ m. de la pared, asegurando y^+ menor de 1, y así resolver adecuadamente la capa límite en esta región.

Tres mallas diferentes fueron construidas para desarrollar las simulaciones y asegurar una solución independiente del mallado, como se muestra en la Figura 3. En la primera malla, el espaciado de la cuadrícula fue de 2 mm. y 2 cm. en la dirección radial y axial, respectivamente; en la segunda, el espaciado de la cuadrícula fue de 2.5 mm. y 2.5 cm.; en la tercera, el espaciado de la cuadrícula fue de 3 mm. y 3 cm. El número total de celdas en cada malla fue 465.280, 258.186 y 174.420, respectivamente.

Figura 3. Tres mallados utilizados en las simulaciones de CFD



Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la resolución del tiempo, fue empleado un paso de tiempo de $1 \cdot 10^{-3}$ s, con el propósito de mantener el número de corriente convectivo (CFL) por debajo de 0.25 [Ec. (1)], y, de esta forma, garantizar la estabilidad de la solución numérica.

$$CFL \leq u \Delta x / \Delta t \quad (1)$$

donde u es la velocidad, Δt es el paso de tiempo y Δx es el intervalo de longitud (tamaño de la malla).

2.32 M odelo numérico

En el marco del presente estudio, el flujo tipo *slug* se ha considerado inmiscible y el gas compresible (gas ideal). Esta condición se simuló con el modelo VOF, que es una técnica de seguimiento de la interfase aplicada a los fluidos inmiscibles con partículas más grandes que el tamaño de la malla; la solución de la fase dispersa se desprende directamente de la condición de cierre que posee la fracción de volumen de flujos incompresibles. Un único conjunto de ecuaciones de momento se resuelve para la fase continua del flujo bifásico, que es dependiente de las fracciones volumétricas de todas las fases, a través de propiedades como la densidad y viscosidad. La ecuación de continuidad [Ec. (2)] garantiza el balance de masa en el sistema (Hernández-Pérez, Abdulkadir & Azzopardi, 2011).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

La ecuación de momento [Ec. (3)] considera las fuerzas que actúan sobre el sistema.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial j} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial j} (-\rho u_i' u_j') \right) \quad (3)$$

donde U_i es el componente i de la velocidad del fluido, X_j es la coordenada espacial j , P es la presión estática, μ_{eff} es la viscosidad efectiva, δ_{ij} es la delta de Kronecker y $(-\rho u_i' u_j')$ es el tensor de Reynolds. El seguimiento de las interfaces entre las fases, se obtiene a partir de la solución asignada

a la ecuación de continuidad para la fracción de volumen (α) de una de las fases [Ec. (4)].

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (4)$$

donde q es la fase líquida o gaseosa. En el método de VOF, el campo de la fracción de vacío tendrá los siguientes valores: $\alpha = 0$, si la celda está vacía (sin gas); $\alpha = 1$, si la celda está llena, y $0 < \alpha < 1$, si contiene la interfaz entre los dos fluidos. Para un sistema de dos fases, la densidad y la viscosidad están vinculadas a la fracción volumétrica dada mediante las siguientes relaciones:

$$\rho = \alpha \rho_g + (1 - \alpha) \rho_l \quad (5)$$

$$\mu = \alpha \mu_g + (1 - \alpha) \mu_l \quad (6)$$

La tensión superficial entre los dos fluidos es el resultado de un desequilibrio en las fuerzas de atracción de las moléculas y en la interfase de los fluidos. En el modelo de VOF, la tensión superficial se introduce como una fuerza que actúa sobre la malla contenida en la interfaz. En STAR-CCM+, la tensión superficial es modelada con el método de la fuerza superficial continua (Continuum Surface Force - CSF), que considera la caída de presión a lo largo de la burbuja.

Para el cálculo de los flujos en el volumen de control por el modelo de VOF, se utilizó un esquema de discretización de segundo orden (Hernández-Pérez, Abdulkadir & Azzopardi, 2011). Es importante tener en cuenta, en el caso de la simulación numérica, la forma en que las burbujas ascienden a través del líquido, debido a la turbulencia, creando así una película alrededor de ellas y una estela detrás de las mismas (Taha & Cui, 2006). Un gradiente de velocidad se produce en la interfase gas-líquido, toda vez que el gas se mueve mucho más rápido que la fase líquida (deslizamiento). Se utilizó el modelo realizable k - ϵ para simular la turbulencia en el flujo bifásico. Este modelo fue elegido, porque es computacionalmente eficiente y ha sido utilizado con éxito para simular muchos procesos industriales, incluyendo flujos bifásicos (Hernández-Pérez, Abdulkadir & Azzopardi, 2011). El modelo se

describe mediante las ecuaciones elípticas [Ec. (7) y (8)], que requieren un cierre para las ecuaciones de Reynolds Promedio de Navier-Stokes (RANS).

$$\rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \epsilon \quad (7)$$

$$\rho u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \mu_t \frac{\epsilon}{k} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - C_2 \frac{\epsilon}{k} \rho \epsilon \quad (8)$$

donde k es la energía cinética turbulenta, ϵ es la tasa de disipación turbulenta, y σ_k , σ_ϵ , C_1 y C_2 son constantes con valores de 1.0, 1.2, 1.44 y 1.9, respectivamente. En las ecuaciones de Navier-Stokes se debe corregir la viscosidad del fluido por turbulencia. Estas ecuaciones emplean una viscosidad efectiva [Ec. (9)].

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad (9)$$

donde μ_t es la viscosidad turbulenta.

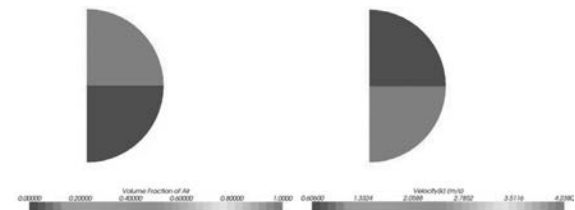
Para resolver el sistema de ecuaciones en derivadas parciales, la discretización de las Ec. (2) a (9) se llevó a cabo utilizando un método de volúmenes finitos con un solver segregado en STAR-CCM+. Las ecuaciones de continuidad y momento deben estar vinculadas mediante el método Simple (método semi-implícito en las ecuaciones de presión). Además, el solver iterativo usó la técnica algebraica *multigrid* (AMG), que ofrece mejores tasas de convergencia. Todas las simulaciones en este trabajo se realizaron bajo condiciones dependientes del tiempo, debido a la naturaleza transitoria de los flujos bifásicos. Factores de relajación de 0.3, 0.7 y 0.8, se aplicaron a la presión, momento y turbulencia en energía cinética, respectivamente (Hernández-Pérez, Abdulkadir & Azzopardi, 2011).

2.3 Condiciones de frontera

La condición de no deslizamiento se utilizó para el componente de la velocidad en la pared,

puesto que el fluido, que está en contacto con ella, es estacionario. En la entrada, se fijaron dos condiciones diferentes (Figura 4): (i) las fracciones de volumen de 0 para el agua y 1 para el aire, localizadas en la parte inferior y superior de la tubería, y (ii) la velocidad superficial de cada fase. Es importante anotar que las velocidades superficiales en este punto son dos veces mayores, en comparación con la velocidad superficial de las fases reportadas en el experimento. La razón es que el aire (o agua) está entrando en el dominio numérico solo a través de la mitad de la sección transversal del tubo; por lo tanto, para mantener el balance de masa de la velocidad, este tiene que ser duplicado en la entrada. Sin embargo, el esquema numérico permitirá desarrollar el flujo y, finalmente, conseguir las velocidades superficiales apropiadas. Este enfoque fue necesario, ya que el inyector de aire no se modeló y la entrada de la tubería simplemente se dividió en dos secciones. Se está trabajando para utilizar los datos del UST en la entrada de la tubería, como se explica en la sección 2.2. Se espera que esta parte del esquema numérico esté funcionando en un futuro próximo.

Figura 4 Condiciones iniciales para (a) fracción de vacío y (b) velocidad en la dirección axial



Fuente: elaboración propia.

3 Resultados

3.1 Resultados experimentales

Se ensayaron diez combinaciones de velocidades superficiales de aire y agua, como se presentan en la Tabla 1. Para las condiciones 5 y 6, los resultados de fracción de vacío se obtuvieron a partir de los datos ultrasónicos utilizando el método desarrollado por Grangeiro (2010). Todavía se están analizando los resultados de la UST para las condiciones restantes, dado que presentan dificultades con respecto a la detección del comienzo y el final de las burbujas. Por el

momento, los resultados de fracción de vacío en estos casos, como se informa en la Tabla 1, se obtuvieron conforme a la correlación de Lockhart y Martinelli (1949).

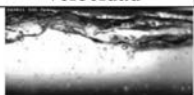



Tabla 1 Velocidades superficiales de agua y aire y fracción de vacío

Condición	[m/s]	[m/s]	[-]
	u_{sl}	u_{sg}	α
1	1.768	0.886	0.264
2	0.173	0.596	0.371
3	0.532	0.711	0.545
4	1.285	0.611	0.230
5	1.952	0.646	0.210
6	1.931	0.693	0.208
7	2.119	0.303	0.133
8	3.102	0.384	0.134
9	2.957	0.594	0.142
10	1.906	0.553	0.208

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 5 se muestra una captura de pantalla de la cámara de alta velocidad, para el caso de las condiciones 1 y 6. El tamaño de la ventana de observación fue de 12 x 5.4 cm.², lo que impidió observar completamente las celdas de flujo *slug* en una sola toma. Las áreas más oscuras, ubicadas en la parte inferior de las fotografías, son sombras de la iluminación que no se pueden eliminar. Las distribuciones del modelo CFD, en el caso del agua y el aire, sobre la sección transversal del tubo, coinciden, en general, con las fotos de la cámara. Además, se observa que las porciones rojas (fracción de aire) aumentan hacia la derecha, de forma similar a la solución numérica (donde está la cola de la burbuja).

Figura 5 Cámara de alta velocidad y simulaciones en CFD (azul agua y rojo aire) para las condiciones 1 y 6

Condición	Cámara de alta velocidad	CFD
1		
6		

Fuente: elaboración propia.

32 Resultados de la CFD

Se hizo una comparación de estas tres mallas, de acuerdo con los resultados experimentales, para la condición 6 (Tabla 2). Dichos resultados para la velocidad y la fracción de vacío, se obtuvieron a partir de las mediciones ultrasónicas, según el procedimiento presentado por Grangeiro (2010).

Tabla 2. Comparación de las diferentes mallas, en términos de la fracción de vacío y la velocidad de la burbuja para la condición 6

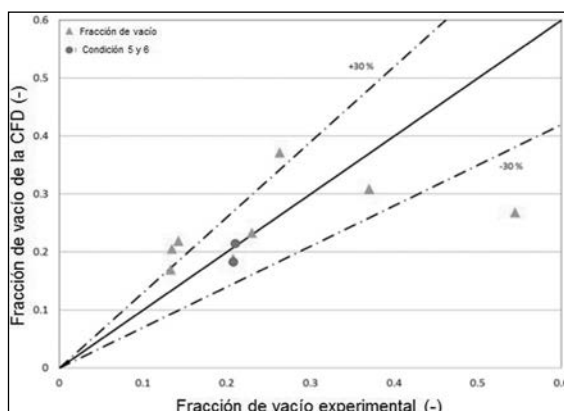
			Error (%)	
	α	Velocidad (m/s)	α	Velocidad (m/s)
Experimental	0.13	3.00		
2 mm. malla	0.16	2.73	23.88	9.03
2.5 mm. malla	0.21	2.73	62.17	8.91
3 mm. malla	0.21	2.74	64.17	8.66

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 2, se observa que la malla de 2 mm. tiene una mejor concordancia con los resultados experimentales: 23.8 % de error para la fracción de vacío y 9.03 % para la velocidad.

33 Fracción de vacío

Cada simulación se llevó a cabo durante 30 s., con un paso de tiempo de 0.001 s. Se tomaron solo los últimos cinco segundos (25-30 s.) para analizar la fracción de vacío, con el fin de asegurar que el flujo estuviese completamente desarrollado. La fracción de vacío se midió utilizando una sección transversal a la salida de la sección iii. La Figura 6 compara los resultados de CFD, ya sea con datos ultrasónicos de la fracción de vacío (condición 5 y 6) o con los cálculos de la correlación de Lockhart y Martinelli (1949).

Figura 5 Comparación de la fracción de vacío del CFD con los datos experimentales

Fuente: elaboración propia.

Se realizó una evaluación cuantitativa de las simulaciones numéricas para compararlas con los datos experimentales, empleando los valores de la raíz cuadrada media (RMS), que describen en detalle Godbole, Tang y Ghajar (2011). La expresión a utilizar es:

$$RMS = \left[\frac{1}{N-1} \left(\sum_{i=1}^N \frac{(\alpha_{CFD})_i - (\alpha_{meas})_i}{(\alpha_{meas})_i} \right)^2 \right]^{0.5} \cdot 100\% \quad (10)$$

donde α_{CFD} es el valor obtenido de la CFD para la fracción de vacío y α_{meas} es la fracción de vacío medida, la cual se obtiene al usar la técnica de ultrasonidos o la correlación de Lockhart y Martinelli (1949). N, por su parte, corresponde al número de puntos experimentales ($N = 10$, como se muestra en la Tabla 2).

Se encontró un valor de RMS de 33.3 %, debido a la utilización de la correlación empírica para el cálculo de la fracción de vacío. Como la técnica de UST se desarrolló específicamente para su aplicación en el desarrollo de flujos tipo *slug*, se espera que el error disminuya. Esta disminución demostrará que las simulaciones numéricas se pueden utilizar para predecir con mayor precisión la fracción de vacío, las velocidades de fase y la caída de presión de flujos bifásicos. A pesar de que los presentes resultados no son concluyentes, estos apuntan a la posibilidad de emplear UST/CFD para la simulación de flujos bifásicos.

4C conclusión

El error RMS total de 33.3 %, entre las simulaciones CFD, los datos de UST y la correlación de Lockhart para la fracción de vacío, sigue siendo alto. Sin embargo, con el trabajo que se está realizando, se espera que el error disminuya significativamente.

Agradecimientos

Los autores agradecen a CD-adapco por proporcionar la licencia académica de STAR-CCM+, la cual permitió realizar las simulaciones numéricas. Así mismo, se resalta el apoyo financiero de Petrobras, que fue esencial en el desarrollo de esta investigación. ●

Referencias

- Bond, L. J., Morra, M., Greenwood, M. S., Bamberger, J. A. & Pappas, R. A. (2003). Ultrasonic technologies for advanced process monitoring, measurement, and control. In *20th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*. Vail, CO, USA, 1288-1293.
- Godbole, P. V., Tang, C. C. & Ghajar, A. J. (2011). Comparison of Void Fraction Correlations for Different Flow Patterns in Upward Vertical Two-Phase Flow. *Heat Transfer Engineering*, 32, (10), 843-860.
- Grangeiro, F. A. (2010). *Characterization of the horizontal intermittent air-water flow using the ultrasound technique aided by high-speed filming* (in Portuguese) (master thesis. Petroleum Science and Engineering, Unicamp, Campinas, Brazil).
- Hernández-Pérez, V., Abdulkadir, M. & Azzopardi, B. (2011). Grid Generation Issues in the CFD Modelling of Two-Phase Flow in a Pipe. *Thermal Fluids*, 3, (1), 13-26.
- Lockhart, R. W. & Martinelli, R. C. (1949). Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes. *Chem. Eng. Prog.*, 45, 39-48.
- Murakawa, H., Kikura, H. & Aritomi, M. (2005). Application of ultrasonic Doppler method for bubbly flow measurement using two ultrasonic frequencies. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 29, 843-850.

Ortega, A. J. & Nieckele, A. O. (2005). Simulation of Horizontal Two-Phase Slug Flows Using the Two-Fluid Model with a Conservative and Non-Conservative Formulation. In *18th International Conference on Mechanical Engineering*. Proceedings of COBEM 2005, Ouro Preto, MG, Brazil, COB05-0153.

Ratkovich, N., Chan, C. C. V., Berube, P. R. & Nopens, I. (2009). Experimental study and CFD modelling of a two-phase slug flow for an airlift tubular membrane. *Chem. Eng. Sci.*, 64, (16), 3576-3584.

Ratkovich, N., Majumder, S. K. & Bentzen, T. R. (2013). Empirical correlations and CFD simulations of vertical two-phase gas-liquid (Newtonian and non-Newtonian) slug flow compared against experimental data of void fraction. *Chemical Engineering Research and Design*, 91, (6), 988-998.

Taha, T. & Cui, Z. F. (2006). CFD modelling of slug flow in vertical tubes. *Chem. Eng. Sci.*, 61, (2), 676-687.

Taitel, D. & Barnea, Y. (1989). Transient formulation modes and stability of steady state annular flow. *Chem. Eng. Sci.*, 44, 325-332.

Tanahashi, E. I., Paiva, T. A., Grangeiro, F. A., Carvalho, R. D. M., Venturini, O. J., Bannwart, A. C. & Bizotto, V. C. (2010). Application of the Ultrasonic Technique for Monitoring Intermittent Liquid-Gas and Liquid-Solid Flows. In *7th North American Conference on Multiphase Technology*. MPNA, Banff.

Wada, S., Kikura, H. & Aritomi, M. (2006). Pattern recognition and signal processing of ultrasonic echo signal on two-phase flow. *Flow Measurement and Instrumentation*, 17, 207-224.